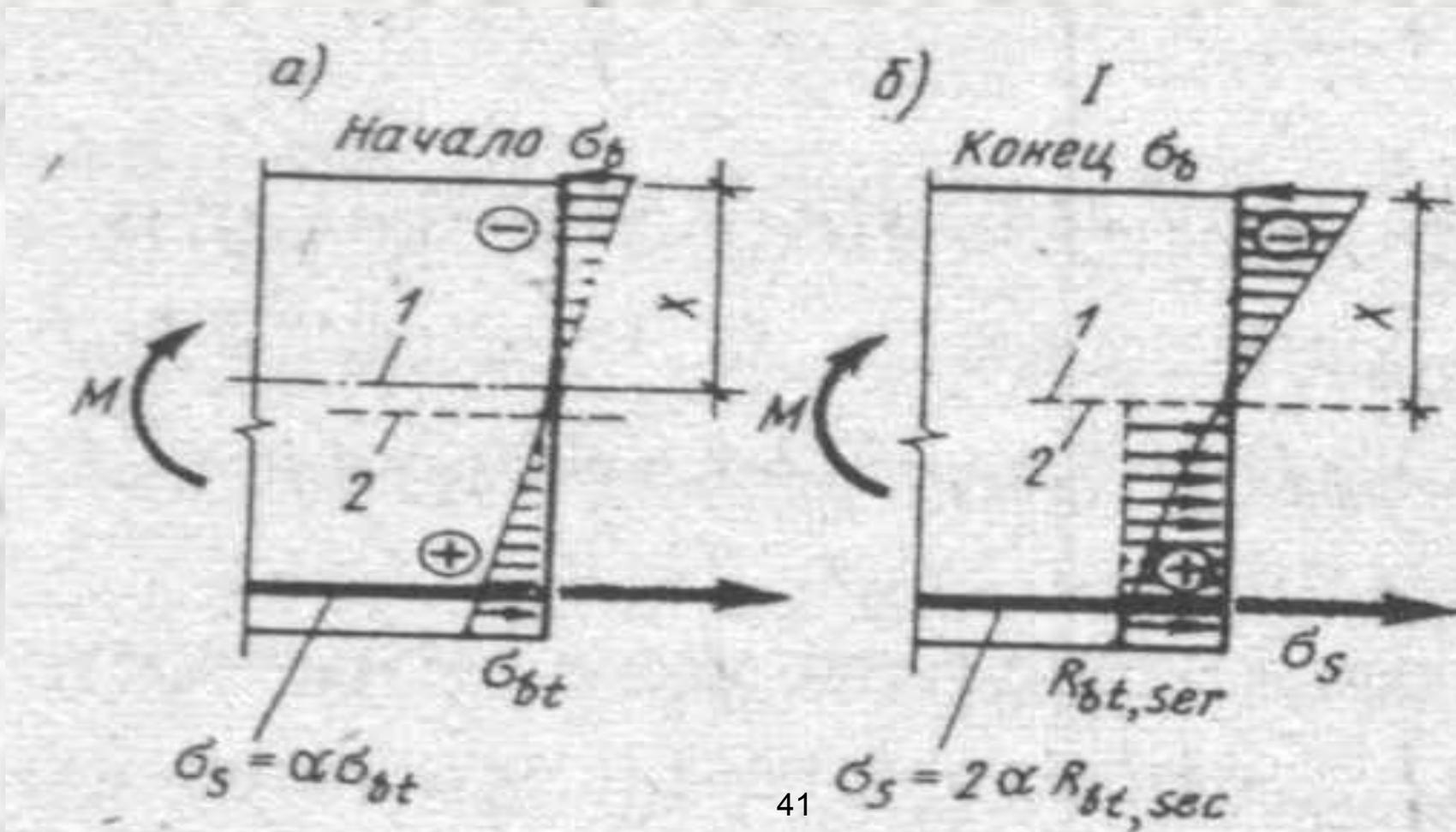


# Три стадии напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций

## I стадия



## I стадия

До появления трещин в растянутой зоне бетона.

Растягивающие усилия воспринимаются совместно бетоном и арматурой.

При малых нагрузках зависимость между  $\sigma$  и  $\varepsilon$  линейная (эпюры  $\sigma$  в растянутой и сжатых зонах бетона – треугольные).

# I стадия

До появления трещин в растянутой зоне бетона.

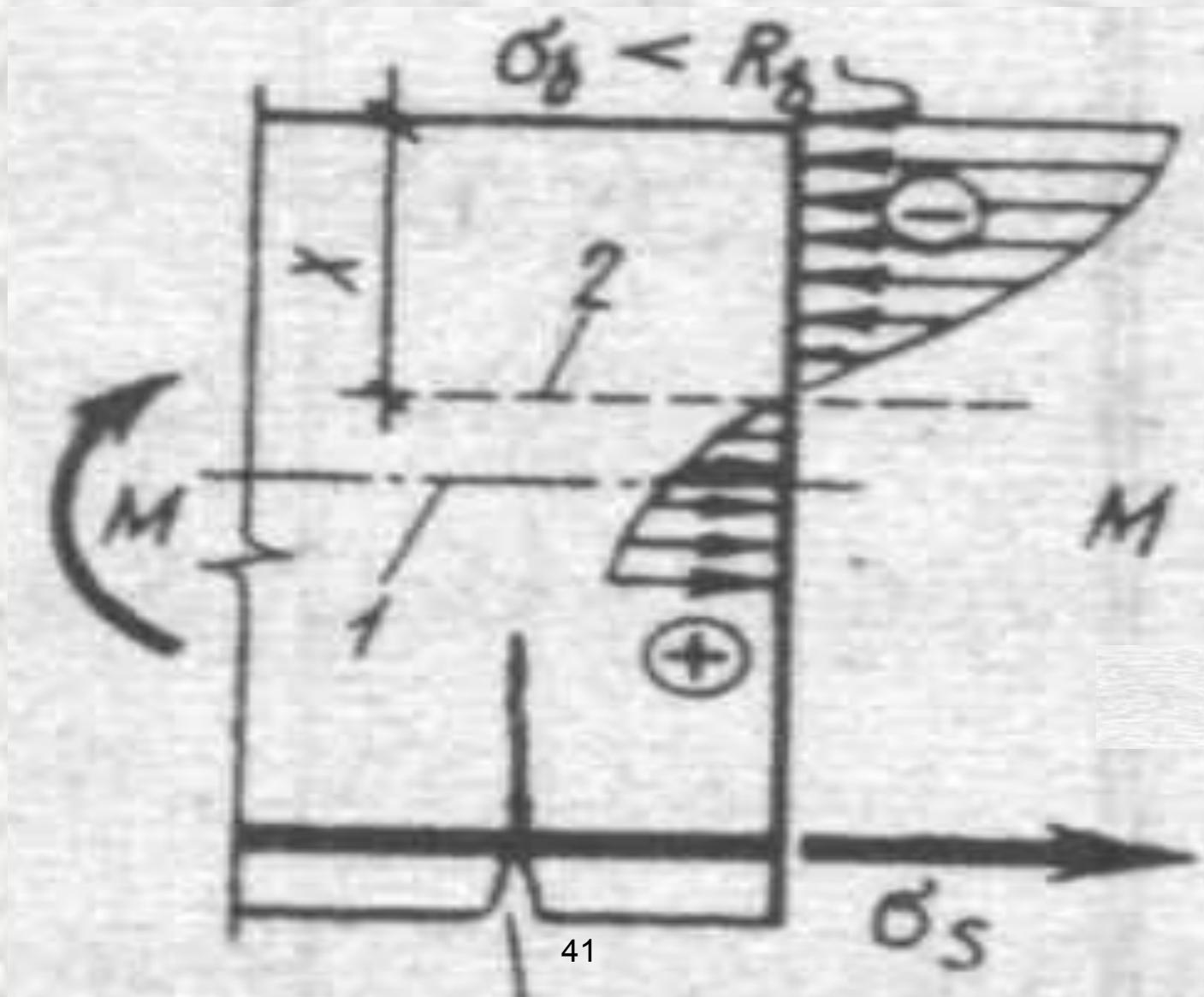
Растягивающие усилия воспринимаются совместно бетоном и арматурой.

При малых нагрузках зависимость между  $\sigma$  и  $\varepsilon$  линейная (эпюры  $\sigma$  в растянутой и сжатых зонах бетона – треугольные).

По мере увеличения нагрузки эпюра  $\sigma$  в растянутой зоне бетона искривляется  $\sigma_{bt} = R_{bt}$ .

По *I стадии НДС* ведется расчет по образованию трещин, нормальных к продольной оси элемента.

## II стадия



## II стадия

После появления трещин в растянутой зоне бетона. Растягивающие усилия воспринимаются арматурой и растянутым бетоном над трещиной (в сечении с трещиной).

На участках между трещинами – арматурой и бетоном совместно.

## II стадия

После появления трещин в растянутой зоне бетона.

Растягивающие усилия воспринимаются арматурой и растянутым бетоном над трещиной (в сечении с трещиной).

На участках между трещинами – арматурой и бетоном совместно.

По мере удаления от сечения с трещиной  $\sigma$  в растянутом бетоне увеличиваются, а в арматуре – уменьшаются.

При увеличении нагрузки эпюра  $\sigma$  в сжатой зоне бетона искривляется, ордината с  $\max \sigma$  в сжатой зоне бетона может перемещаться с края сечения в его глубину.

***В конце II стадии*** могут проявляться неупругие деформации в арматуре.

## II стадия

После появления трещин в растянутой зоне бетона.

Растягивающие усилия воспринимаются арматурой и растянутым бетоном над трещиной (в сечении с трещиной).

На участках между трещинами – арматурой и бетоном совместно.

По мере удаления от сечения с трещиной  $\sigma$  в растянутом бетоне увеличиваются, а в арматуре – уменьшаются.

При увеличении нагрузки эпюра  $\sigma$  в сжатой зоне бетона искривляется, ордината  $\sigma$  в сжатой зоне бетона может перемещаться с края сечения в его глубину.

В конце II стадии могут проявляться неупругие деформации в арматуре.

***II стадия НДС*** используется при расчете ***по II группе предельных состояний*** – расчет ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента, и расчет перемещений (прогибы и углы поворота).

## III стадия

Характеризуется относительно коротким периодом работы элемента.

Напряжения в бетоне достигают временного сопротивления сжатию, напряжения в арматуре — физического или условного предела текучести, а в высокопрочной проволоке — временного сопротивления разрыву.

## III стадия

Характеризуется относительно коротким периодом работы элемента.

Напряжения в бетоне достигают временного сопротивления сжатию, напряжения в арматуре – физического или условного предела текучести, а в высокопрочной проволоке – временного сопротивления разрыву.

Последовательность разрушения зон - растянутой и сжатой зависит от процента армирования и может меняться.

## III стадия

Характеризуется относительно коротким периодом работы элемента.

Напряжения в бетоне достигают временного сопротивления сжатию, напряжения в арматуре – физического или условного предела текучести, а в высокопрочной проволоке – временного сопротивления разрыву.

Последовательность разрушения зон - растянутой и сжатой зависит от процента армирования и может меняться.

**Случай 1. Разрушение элемента начинается с растянутой арматуры**

# III стадия    *Случай 1*

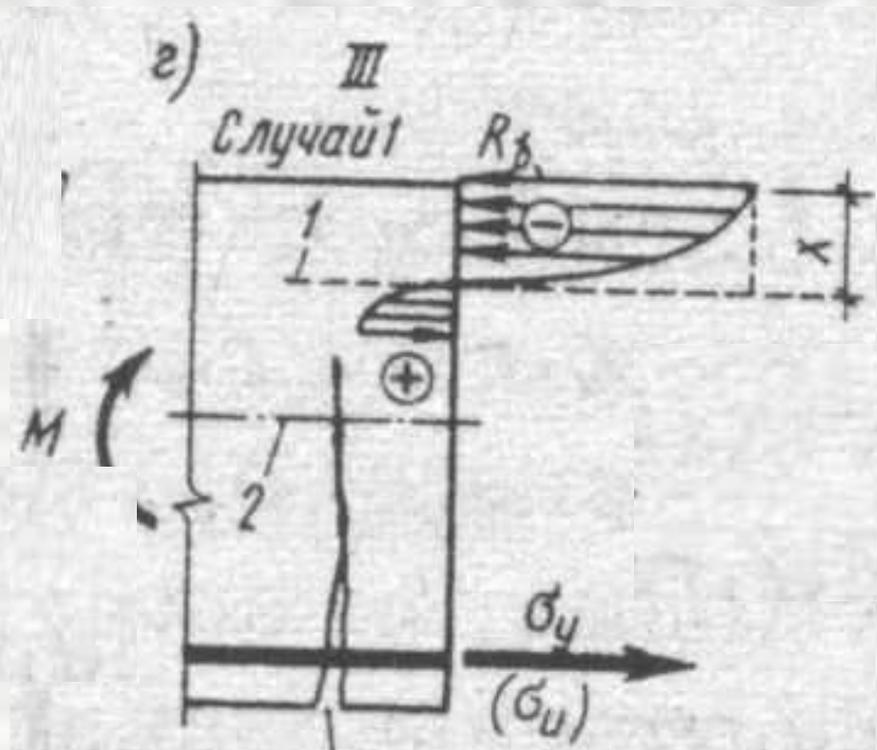
Характеризуется относительно коротким периодом работы элемента.

Напряжения в бетоне достигают временного сопротивления сжатию, напряжения в арматуре – физического или условного предела текучести, а в высокопрочной проволоке – временного сопротивления разрыву.

Последовательность разрушения зон - растянутой и сжатой зависит от процента армирования и может меняться.

**Случай 1.** Разрушение элемента начинается с растянутой арматуры

Напряжения в арматуре достигают физического или условного предела текучести или при армировании высокопрочной проволокой с малым относительным удлинением  $\approx 4\%$ .



# III стадия    *Случай 1*

Характеризуется относительно коротким периодом работы элемента.

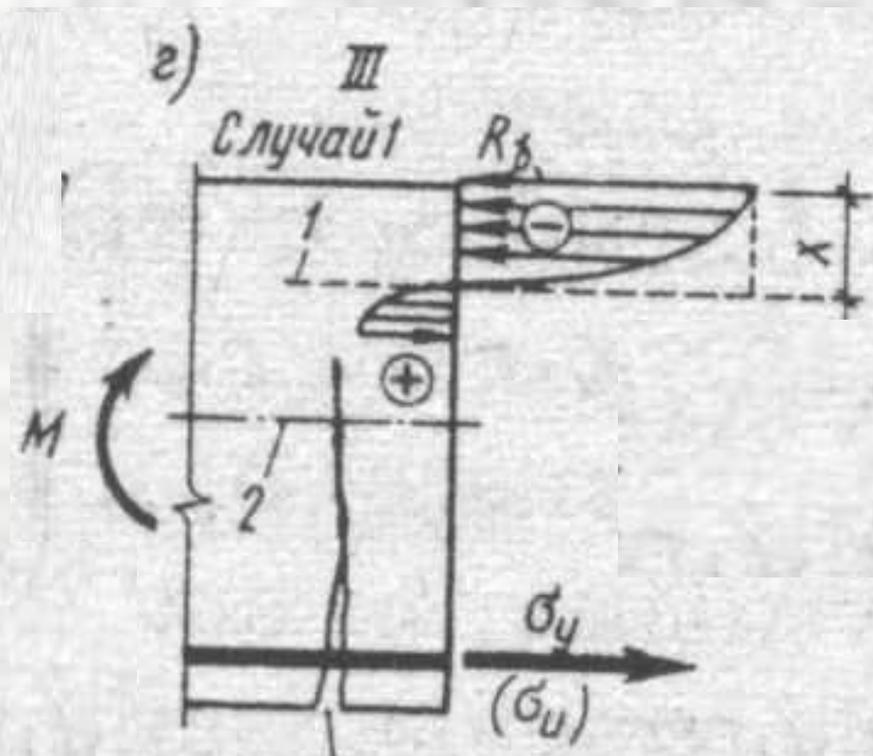
Напряжения в бетоне достигают временного сопротивления сжатию, напряжения в арматуре – физического или условного предела текучести, а в высокопрочной проволоке – временного сопротивления разрыву.

Последовательность разрушения зон - растянутой и сжатой зависит от процента армирования и может меняться.

**Случай 1.** Разрушение элемента начинается с растянутой арматуры

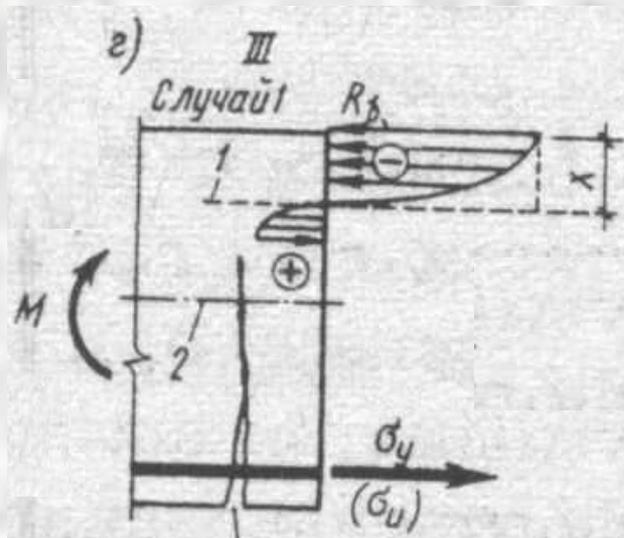
Напряжения в арматуре достигают физического или условного предела текучести или при армировании высокопрочной проволокой с малым относительным удлинением  $\approx 4\%$ .

Напряжения в бетоне сжатой зоны под влиянием нарастающего прогиба и сокращения высоты сжатой зоны бетона достигает значения временного сопротивления.



# III стадия *Случай 1*

**Случай 1. Разрушение элемента начинается с растянутой арматуры**

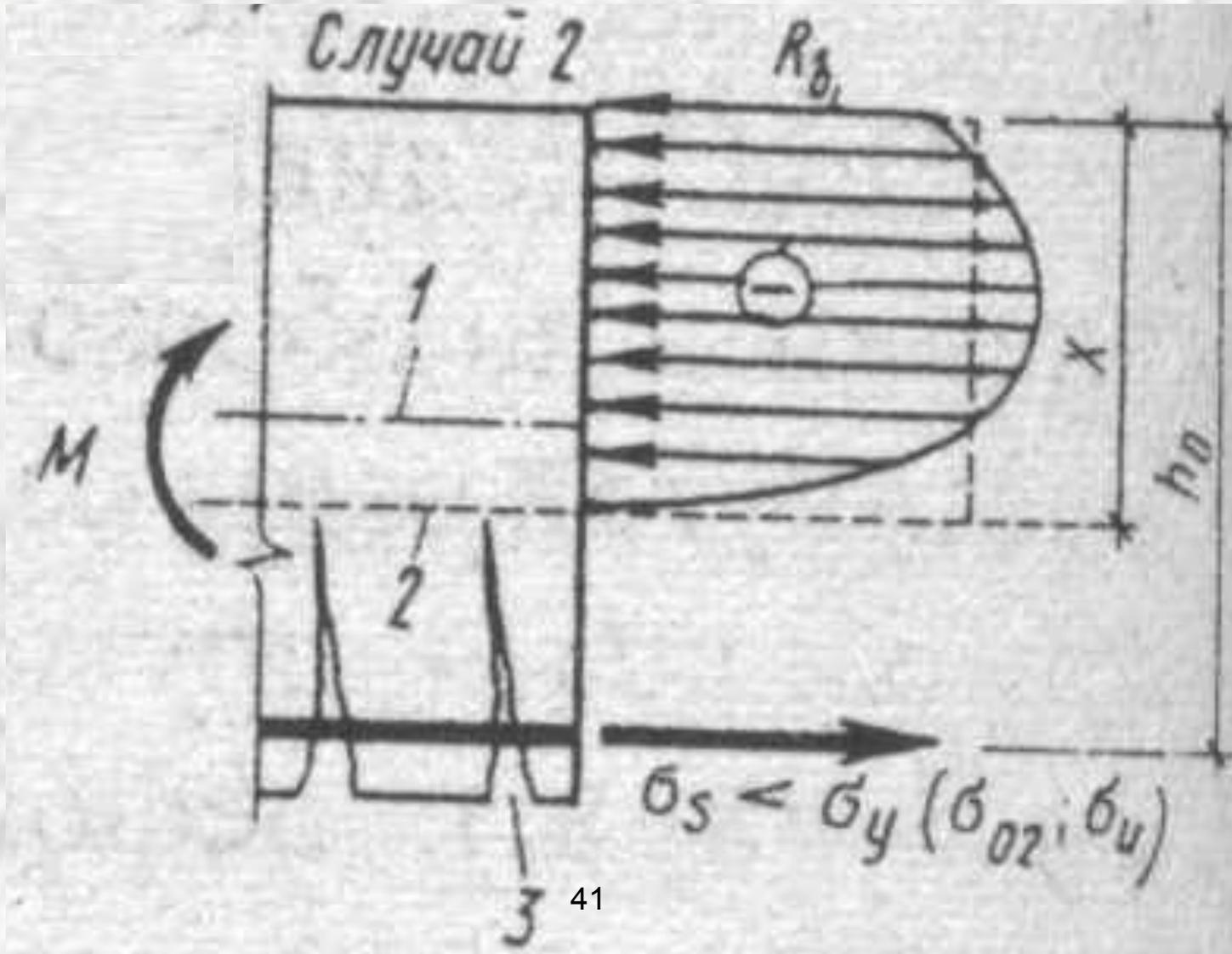


Напряжения в арматуре достигают физического или условного предела текучести или при армировании высокопрочной проволокой с малым относительным удлинением  $\approx 4\%$ .

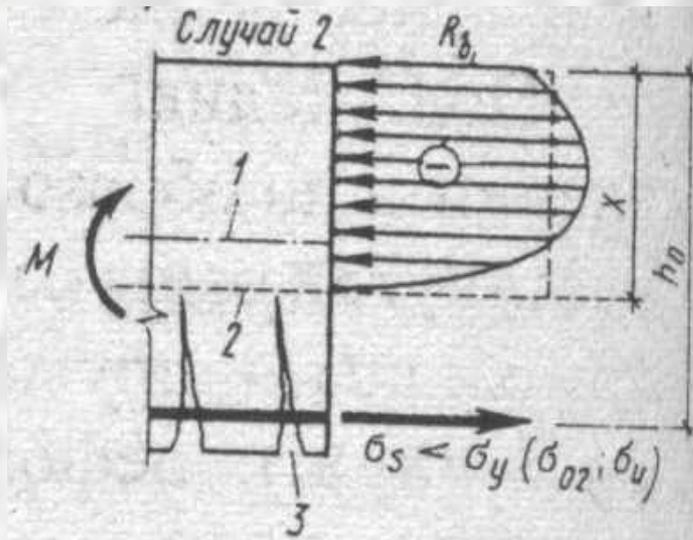
Напряжения в бетоне сжатой зоны под влиянием нарастающего прогиба и сокращения высоты сжатой зоны бетона достигает значения временного сопротивления.

Разрушение носит **пластический характер**, начинается появлением пластических деформаций в растянутой арматуре и заканчивается раздроблением сжатой зоны бетона.

# III стадия    Случай 2



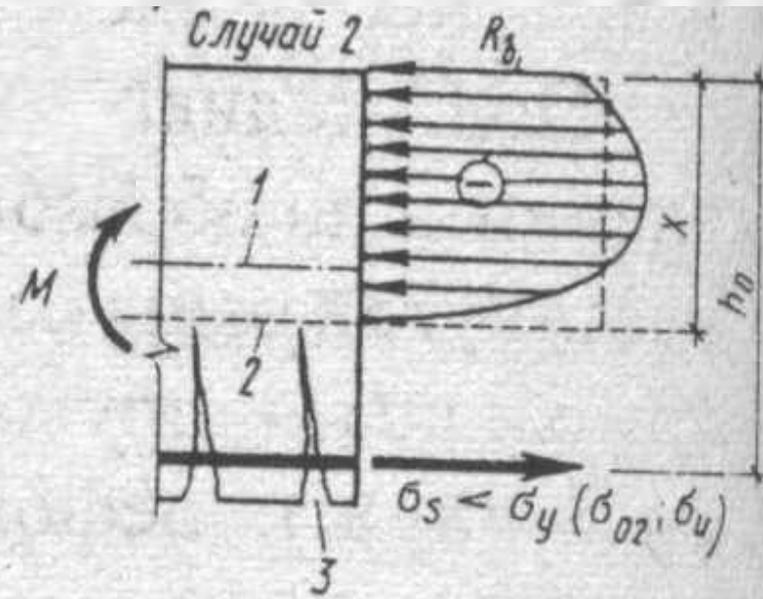
## III стадия    Случай 2



Характерен для перearмированных элементов.

Напряжения в растянутой арматуре не достигают физического или условного предела текучести.

## III стадия    *Случай 2*



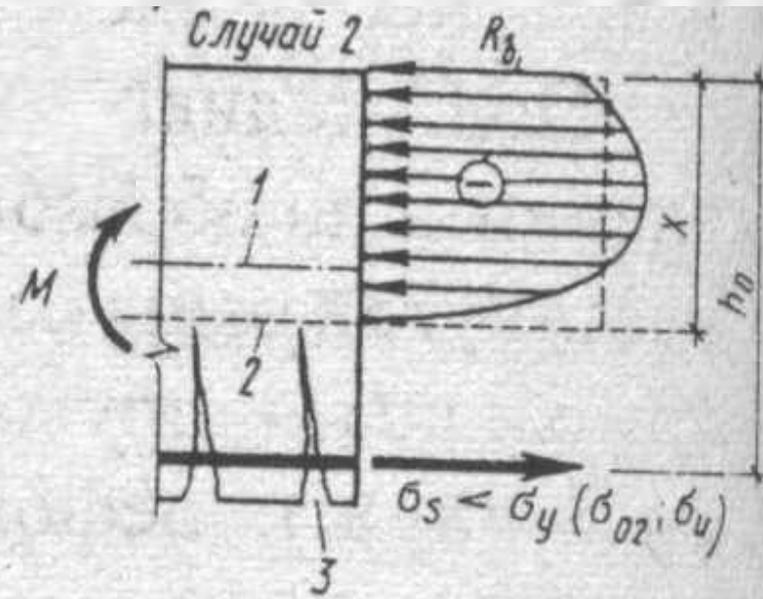
Характерен для перearмированных элементов.

Напряжения в растянутой арматуре не достигают физического или условного предела текучести.

Разрушение начинается раздроблением сжатой бетона и носит *хрупкий* характер.

***Переход из II стадии в III стадию происходит внезапно.***

## III стадия    *Случай 2*



Характерен для перearмированных элементов.  
Напряжения в растянутой арматуре не достигают физического или условного предела текучести.  
Разрушение начинается раздроблением сжатой бетона и носит *хрупкий* характер.  
***Переход из II стадии в III стадию происходит внезапно.***

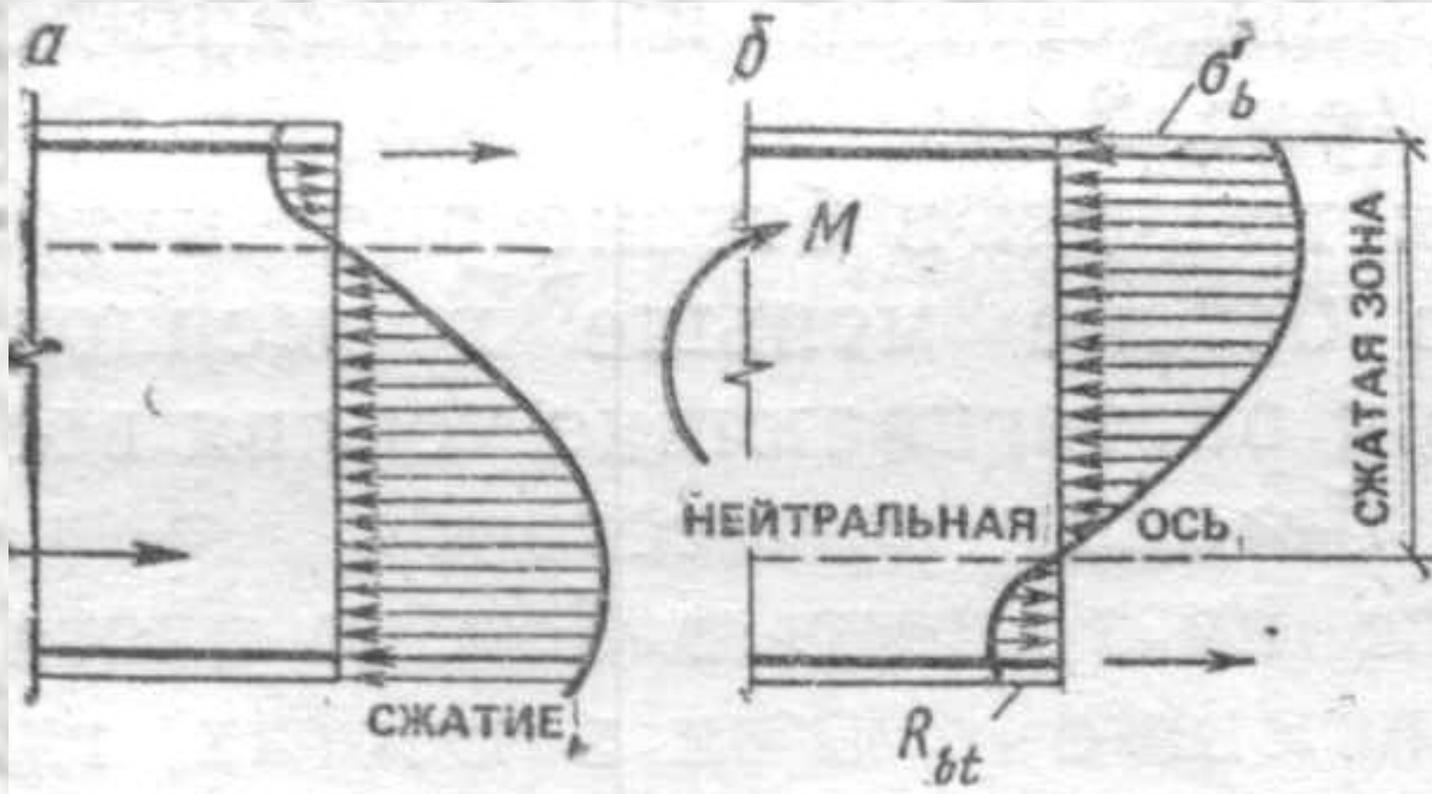
Напрягаемая арматура в сжатой зоне в ***III стадии*** испытывает сжимающие напряжения, обусловленные предельной сжимаемостью бетона:  $\sigma_y \geq \sigma'_s \leq \varepsilon_{ub} \cdot E_s$

# Три стадии напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций

Изгибаемые элементы в разных по длине сечениях испытывают разные стадии НДС.

Разные стадии НДС железобетонного элемента могут возникать на различных этапах – при изготовлении и предварительном напряжении, транспортировании, монтаже и эксплуатации.

# Напряжения в бетоне в нормальных сечениях при изгибе предварительного напряженного элемента



*a* – при обжатии; *b* – после приложения внешней нагрузки, *стадия I*

# Напряжения в бетоне в нормальных сечениях при изгибе предварительного напряженного элемента

В процессе обжатия в преднапряженных элементах возникают сжимающие напряжения высокого уровня. Эпюра сжимающих напряжений приобретает криволинейный характер.

В процессе нагружения внешней нагрузкой предварительное напряжение в бетоне погашается и возникающие растягивающие напряжения приближаются к временному сопротивлению бетона растяжению.

# Процесс развития трещин в растянутых зонах бетона

Трещины в железобетонных конструкциях образуются в результате различных причин:

- Усадки бетона и условий твердения;
- Внецентренным предварительным напряжением;
- Внешними нагрузками;
- Осадками опор;
- Изменением температуры.

# Процесс развития трещин в растянутых зонах бетона

Трещины в железобетонных конструкциях образуются в результате различных причин:

- Усадки бетона и условий твердения;
- Внецентренным предварительным напряжением;
- Внешними нагрузками;
- Осадками опор;
- Изменением температуры.

Трещины в растянутых зонах бетона не так опасны, тогда как силовые трещины в сжатых зонах бетона свидетельствуют о перегрузке конструкции, они опасны для прочности конструкции.

# Процесс развития трещин в растянутых зонах бетона

Трещины в железобетонных конструкциях образуются в результате различных причин:

- Усадки бетона и условий твердения;
- Внецентренным предварительным напряжением;
- Внешними нагрузками;
- Осадками опор;
- Изменением температуры.

Трещины в растянутых зонах бетона не так опасны, тогда как силовые трещины в сжатых зонах бетона свидетельствуют о перегрузке конструкции, они опасны для прочности конструкции.

Образование трещин в растянутых зонах бетона обусловлено малой растяжимостью бетона.

При обычных процентах армирования предельная растяжимость железобетонных конструкций незначительно превышает предельную растяжимость неармированного бетона.

# Процесс развития трещин в растянутых зонах бетона

Трещины в железобетонных конструкциях образуются в результате различных причин:

- Усадки бетона и условий твердения;
- Внецентренным предварительным напряжением;
- Внешними нагрузками;
- Осадками опор;
- Изменением температуры.

Трещины в растянутых зонах бетона не так опасны, тогда как силовые трещины в сжатых зонах бетона свидетельствуют о перегрузке конструкции, они опасны для прочности конструкции.

Образование трещин в растянутых зонах бетона обусловлено малой растяжимостью бетона.

При обычных процентах армирования предельная растяжимость железобетонных конструкций незначительно превышает предельную растяжимость неармированного бетона.

При ограниченной ширине раскрытия, трещины в растянутой зоне часто не опасны и не нарушают общей монолитности бетона.

# Процесс развития трещин в растянутых зонах бетона

Трещины в растянутых зонах бетона не так опасны, тогда как силовые трещины в сжатых зонах бетона свидетельствуют о перегрузке конструкции, они опасны для прочности конструкции.

Образование трещин в растянутых зонах бетона обусловлено малой растяжимостью бетона.

При обычных процентах армирования предельная растяжимость железобетонных конструкций незначительно превышает предельную растяжимость неармированного бетона.

При ограниченной ширине раскрытия, трещины в растянутой зоне часто не опасны и не нарушают общей монолитности бетона.

Различают 3 этапа развития трещин в растянутых зонах:

- Возникновение микротрещин (невидимые);
- Образование трещин;
- Раскрытие трещин до предельно допустимых значений.

Исторически этот метод был разработан первым.  
За основу принята *II стадия НДС*.

***Метод основан на следующих допущениях:***

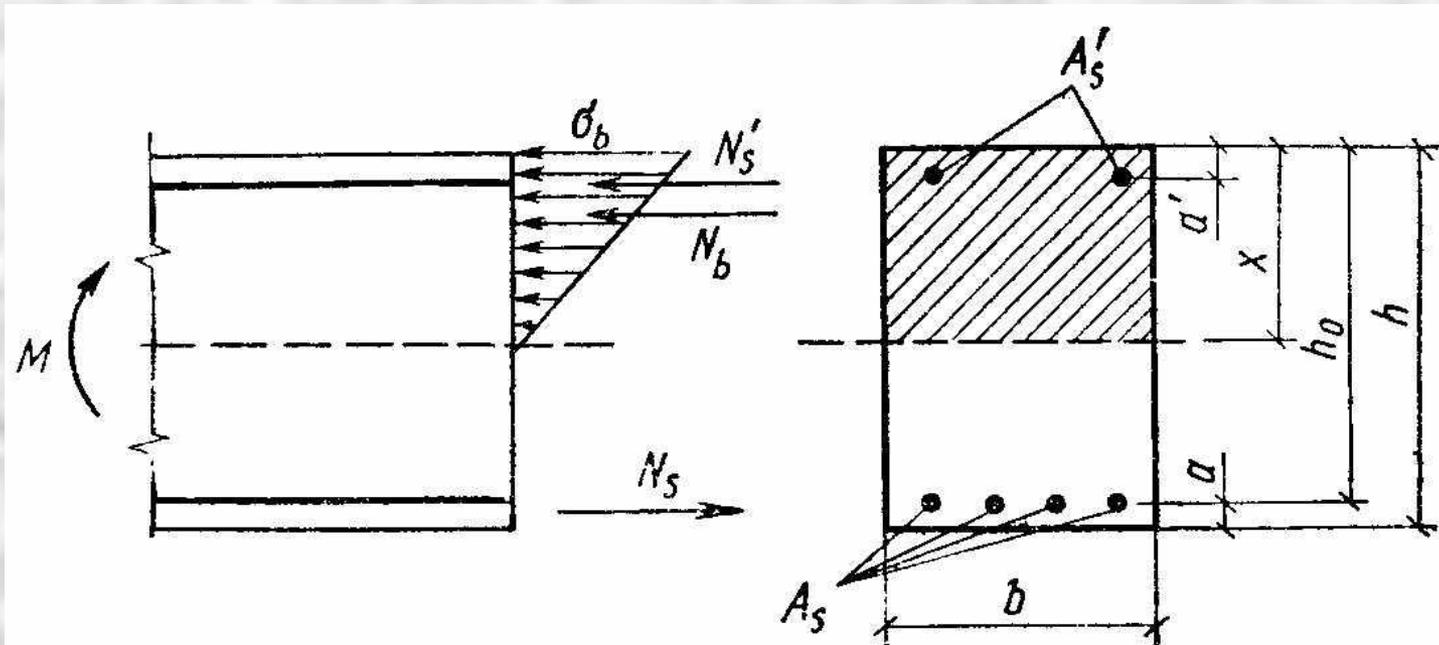
- Справедлива гипотеза плоских сечений;
- Бетон растянутой зоны не работает;
- Растягивающие усилия воспринимаются арматурой;
- Бетон сжатой зоны работает упруго.

# Метод расчета по допускаемым напряжениям

Самостоятельно:

Как следствие из последнего допущения в бетоне сжатой зоны принимается треугольная эпюра напряжений и постоянное отношение модулей упругости арматуры и бетона:

$$\alpha = E_s / E_b$$



Рассматривается приведенное однородное сечение, в котором площадь сечения арматуры  $A_s$  заменяют площадью сечения бетона равной  $\alpha A_s$ , а площадь сечения сжатой арматуры  $A'_s$  площадью сечения бетона  $\alpha A'_s$

## *МЕТОДИКА РАСЧЕТА*

Из равенства деформаций:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s} = \varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b}$$

$$\sigma_s = \frac{E_s}{E_b} \cdot \sigma_b = \alpha \cdot \sigma_b \quad \sigma_b = \frac{M \cdot x}{I_{red}}$$

$$\sigma_s = \alpha \cdot \frac{M \cdot (h_0 - x)}{I_{red}} \quad \text{и} \quad \sigma'_s = \alpha \cdot \frac{M \cdot (x - a')}{I_{red}}$$

Высоту сжатой зоны сечения  $x$  находят из условия равенства нулю статического момента приведенного сечения относительно нейтральной оси:

$$S_{red} = \frac{b \cdot x^2}{2} + \alpha \cdot A'_s \cdot (x - a') - \alpha \cdot A_s \cdot (h_0 - x) = 0$$

Момент инерции приведенного сечения:

$$I_{red} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha \cdot A_s \cdot (h_0 - x)^2 + \alpha \cdot A'_s \cdot (x - a')^2$$

Более точное решение:

$$I_{red} = \frac{b \cdot x^3}{3} + \alpha \cdot A_s \cdot (h_0 - x)^2 + (\alpha - 1) \cdot A'_s \cdot (x - a')^2$$

Напряжения в арматуре и бетоне ограничивают допускаемыми напряжениями:

$$\sigma_s = 0,5 \cdot \sigma_y;$$

$$\sigma_b = 0,45 \cdot R,$$

*(где  $R$  – марка бетона на осевое сжатие)*

Марка бетона — среднестатистическая кубиковая прочность.

# Метод расчета по допускаемым напряжениям

## Недостатки:

## Самостоятельно:

- бетон рассматривается как упругий материал;
- установлено, что действительные напряжения в арматуре меньше вычисленных;
- не дает возможность спроектировать конструкцию с заранее заданным коэффициентом запаса и не позволяет определить истинные напряжения в материалах.

Особенно отчетливо проявились недостатки при внедрении в практику новых видов бетонов (легких бетонов на пористых заполнителях, тяжелые бетоны высоких классов) и арматурных сталей высокой прочности.

Введен в нормы в 1938 г.

Исходя из *III стадии НДС.*

*Допущения:*

- Бетон растянутой зоны не работает;
- Напряжения в бетоне сжатой зоны равны пределу прочности при сжатии;
- Эпюра напряжений в бетоне сжатой зоны вначале была принята криволинейной (квадратная парабола), а с *1944г. – прямоугольная (диаграмма жестко-пластического тела);*

Введен в нормы в 1938 г.

Исходя из *III стадии НДС*.

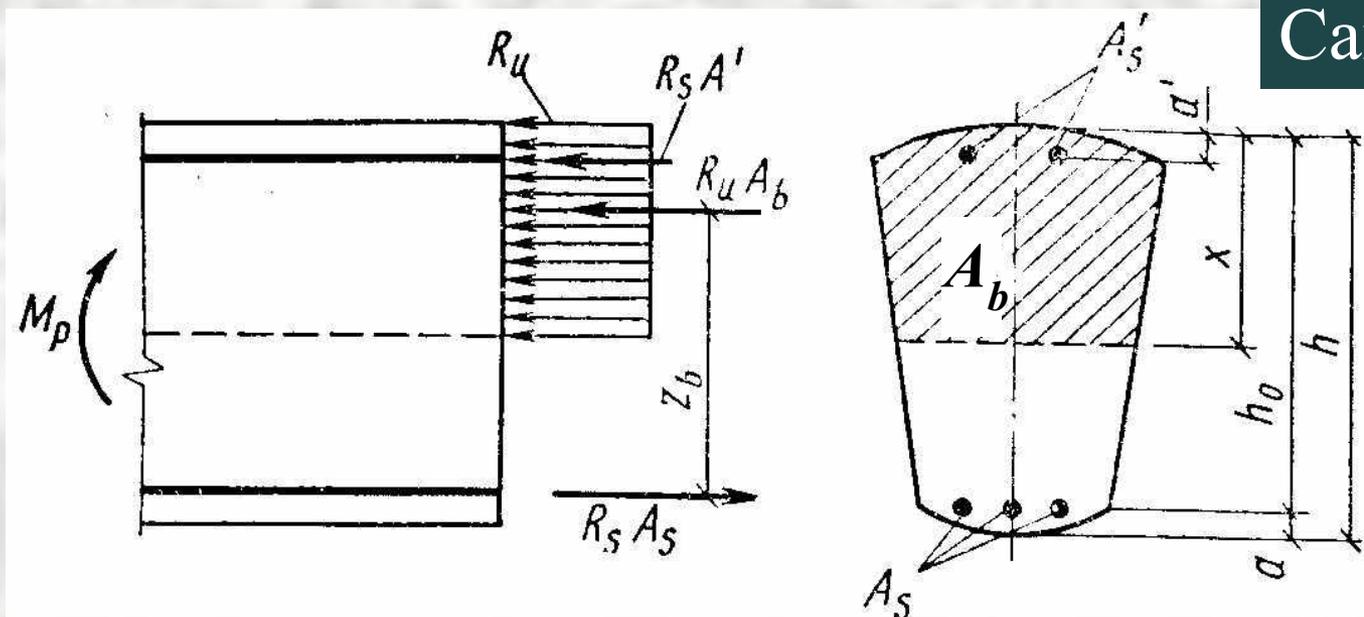
### **Допущения:**

- Бетон растянутой зоны не работает;
- Напряжения в бетоне сжатой зоны равны пределу прочности при сжатии;
- Эпюра напряжений в бетоне сжатой зоны вначале была принята криволинейной (квадратная парабола), а с 1944г. – прямоугольная (диаграмма жестко-пластического тела);
- Растягивающие усилия воспринимаются арматурой;
- Напряжения в арматуре равны пределу текучести;
- Усилие, допускаемое при эксплуатации, обеспечивается делением значения разрушающего усилия на единый коэффициент запаса прочности:

$$M = M_p / K; \quad N = N_p / K$$

# Метод расчета по разрушающим усилиям

Самостоятельно:



Для элементов, работающих по *1 случаю*, вместо гипотезы плоских сечений, использован *принцип пластических разрушений*, сформулированный А.Ф. Лолейтом в 1931г.: *при изгибе железобетонной балки вследствие развития пластических деформаций в арматуре и бетоне в стадии разрушения напряжения достигают предельных значений, что и определяет разрушающий момент.*

Высота сжатой зоны бетона (из условия равновесия внутренних усилий в стадии разрушения):

$$R_u \cdot A_b + R_s \cdot A'_s = R_s \cdot A_s$$

$$R_u = 1,25 \cdot R_b$$

$A_b$  – площадь сечения сжатого бетона;

$A_b = b \cdot x$  – для прямоугольного сечения;

$R_s$  – предел текучести арматуры

$$M_p = R_u \cdot S_b + R_s \cdot A'_s \cdot (h_0 - a')$$

$$S_b = A_b \cdot z_b = b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x)$$

$$z_b = h_0 - 0,5 \cdot x$$

*где:  $z_b$  – расстояние от центра тяжести сечения растянутой арматуры до центра тяжести площади сечения сжатой зоны бетона.*

Граница между 1 и 2 случаем устанавливалась на основе опытных данных.

**Случай 1 при:**  $S_b / S_0 \leq 0.8$

Самостоятельно:

*где  $S_0$  – статический момент всей рабочей площади сечения бетона относительно центра тяжести растянутой арматуры (для прямоугольных и тавровых сечений с полкой в сжатой зоне  $x \approx 0,55 h_0$ ).*

Значение коэффициента запаса прочности  $K$  зависит:

- От причины разрушения;
- Сочетания силовых воздействий и отношения  $T_v$  к  $T_q$  (усилий временных нагрузок к постоянным):

$$T_v / T_q \leq 2 \rightarrow K = 1,8 \text{ и } T_v / T_q \geq 2 \rightarrow K = 2,0$$

Для сборных конструкций заводского изготовления при основных и дополнительных сочетаниях  $K$  уменьшается на  $0,2$

Этот метод учитывает упругопластические свойства железобетона, более правильно отражает действительную работу элементов по нормальным сечениям, и был серьезным развитием теории сопротивления железобетона.

По сравнению с методом расчета по допускаемым напряжениям в ряде случаев получается меньший расход арматуры.

**Недостаток:** возможные отклонения фактических нагрузок и прочностных характеристик материалов от их расчетных значений не могут быть явно учтены при едином коэффициенте запаса прочности.